

УДК 621

Экспериментальное моделирование процессов газового дивертора реактора-токамака на линейной установке

Н. В. Антонов, В. Б. Петров, Б. И. Хрипунов, В. В. Шапкин
Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

А. М. Литновский
Московский государственный инженерно-физический институт, Москва, Россия

Г. В. Шолин
Институт водородной энергетики и плазменной технологии РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

На установке с прямым магнитным полем "Лента" (Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт") проведено экспериментальное моделирование физических процессов, происходящих в диверторе термоядерного реактора. В ходе экспериментов получен и детально исследован режим отрыва плазмы — предполагаемый основной режим работы дивертора.

Одна из наиболее серьезных проблем в научной и инженерной разработке термоядерных реакторов на основе установок токамак — стационарный отвод тепловой энергии, выделяющейся в плазме в результате термоядерных реакций, таким образом, чтобы разрушение поверхности элементов, контактирующих с плазмой, было минимальным. Наибольшие тепловые нагрузки на поверхность возникают в диверторе, где выходящий из камеры поток плазмы поступает на приемные пластины. Для снижения пиковых значений нагрузки в последние годы интенсивно исследуется вариант газового дивертора, в котором плазменный поток прежде чем попасть на поверхность дивертора проходит через препятствие в виде газовой мишени. Практически на всех токамаках с дивертором продемонстрирована возможность работы в таком режиме, когда взаимодействие плазмы с газом изменяет параметры потока в диверторе, и непосредственно у пластин создается некоторый барьер, "отрывающий" плазму от поверхности (*detached plasma*) и способствующий перераспределению энергии потока на поверхности диверторного устройства.

Реализованы и исследуются режимы с частичным отрывом плазмы от пластин (*partially detached, semi-detached*), сочетающиеся с высокими параметрами удержания основной плазмы. Явление отрыва плазмы от приемной поверхности обнаружено не только на токамаках, но и на других, в частности, линейных плазменных установках, которые широко используются для исследования характерных для отрыва физических процессов, реализуя при этом ряд своих преимуществ перед тороидальными термоядерными системами.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования процессов, протекающих при взаимодействии плазменного потока с газовой мишенью на установке "Лента" с прямым магнитным полем, проведенного для моделирования условий газового дивертора.

Схема эксперимента и методы измерений

Экспериментальное моделирование процессов газового дивертора проводилось на установке "Лента" (Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт"). Установка (рис. 1) имеет линейную конфигурацию, полная ее длина 4,5 м, диаметр цилиндрической разрядной камеры 16 см. Индукция прямого магнитного поля составляет $0,1 \div 0,2$ Тл. Стационарная плазма образуется в результате пучково-плазменного разряда (ППР), возникающего при прохождении электронного пучка через газ. Электронный пучок, генерируемый инжектором, мощность которого достигает 30 кВт, попадает в разрядную зону установки длиной 2 м. В эту зону осуществляется напуск первичного (рабочего) газа, необходимого для зажигания ППР. В разрядной зоне в результате ионизации с помощью ППР рабочего газа образуется первичная плазма, в которую передается до 50 % мощности электронного инжектора. Поток плазмы имеет форму цилиндрического столбца диаметром $3 \div 16$ см. Получаемая плазма имеет следующие параметры: температура электронов $0,5 \div 30$ эВ, плотность плазмы $5 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Более подробные сведения об установке и результаты предыдущих исследований взаимодействия плазмы с газом приведены в работах [1—3].

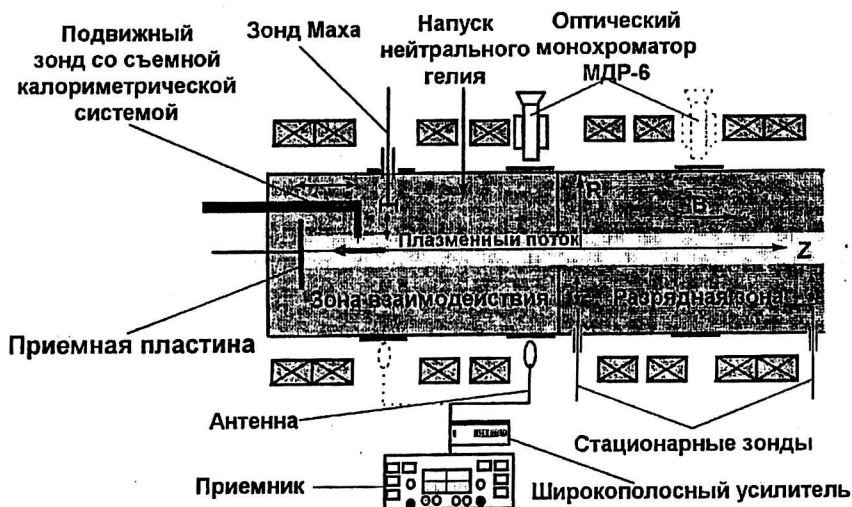


Рис. 1. Схема проведения эксперимента на установке "Лента"

В ходе экспериментов стационарный поток гелиевой плазмы, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, поступал из разрядной зоны установки (см. рис. 1) в зону взаимодействия, в которую осуществлялся напуск вторичного газа — нейтрального гелия (т. н. газовая мишень). В конце зоны взаимодействия была установлена охлаждаемая приемная пластина-имитатор приемной пластины дивертора, на которую впоследствии поступал плазменный поток. Таким образом, прежде чем достичь приемной пластины, поток плазмы взаимодействовал с газовой мишенью длиной 1 м. Мощность, инжектируемая в плазму, варьировалась в пределах от 450 Вт до 2,55 кВт. Давление гелия в разрядной зоне поддерживалось на уровне 5 мторр, обеспечивая тем самым постоянство параметров генерируемой плазмы на входе в газовую мишень. Давление нейтрального гелия в газовой мишени варьировалось в пределах $1 \div 75$ мторр.

Параметры плазмы (плотность и температура электронов) исследовались с помощью аппаратно-программного комплекса зондовой диагностики. Зондовые исследования проводились в зоне взаимодействия (газовой мишени) с использованием подвижного зонда, способного производить измерения в радиальном и продольном направлениях, а также в разрядной зоне, с помощью зондов, перемещаемых вдоль радиуса. Радиальное расстояние R отсчитывалось от оси установки, продольное расстояние Z — от приемной пластины. Измерения параметров плазмы в зоне взаимодействия были проведены на расстоянии $Z = 0 \div 70$ см от приемной пластины при радиальном удалении от оси установки $R = 0 \div 6$ см. В разрядной зоне исследования проводились на расстояниях $Z = 230$ см (центр разрядной зоны) и $Z = 113$ см (вблизи входа плазменного потока в зону взаимодействия). Скорость потока плазмы в зоне взаимодействия измерялась с помощью зонда Маха.

Исследования излучения, исходящего из зоны взаимодействия в видимой и ближней ультрафиолетовой областях, были проведены с помощью системы оптической спектроскопии. В ряде экспериментов производился анализ СВЧ-излучения из зоны взаимодействия и из разрядной зоны; проводились также calorиметрические измерения в потоке плазмы.

Эксперименты проводили по двум основным направлениям:

исследование влияния нейтрального давления в газовой мишени на характер взаимодействия плазмы с газом при постоянной мощности электронного инжектора;

исследование особенностей взаимодействия при изменении параметров плазменного потока путем варьирования мощности инжектора.

Результаты экспериментов

Зависимости продольных распределений плотности плазмы N и температуры электронов T_e от давления нейтрального газа в зоне взаимодействия показаны на рис. 2. Продольные распределения получены на удалении 1,5 и 2 см от оси установки, мощность электронного инжектора составляла 510 Вт.

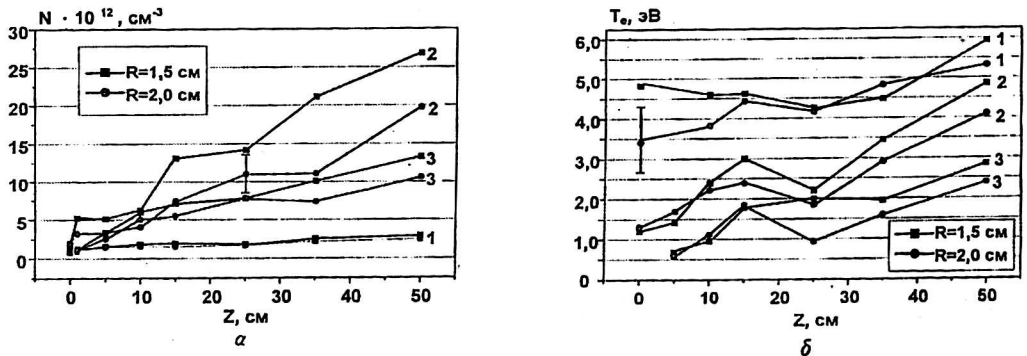


Рис. 2. Продольные распределения:

a — плотности плазмы; b — электронной температуры при различных давлениях нейтрального газа (мторр): 1 — $P_{\text{газ}}=2$; 2 — $P_{\text{газ}}=17$; 3 — $P_{\text{газ}}=35$

Как видно из рис. 2, при низких нейтральных давлениях в зоне взаимодействия ($P_{\text{газ}} \sim 2$ мторр) плотность плазмы и электронная температура в продольном направлении изменялись слабо (см. рис. 2, кривые 1). Повышение давления до $P_{\text{газ}} \sim 15 \div 17$ мторр приводило к сильному увеличению плотности плазмы вдали от приемной пластины (см. рис. 2, a , кривые 2), связанному с

ионизацией нейтрального гелия, и охлаждению плазменных электронов (см. рис. 2, б, кривые 2). При этом температура электронов и плотность плазмы уменьшались по мере приближения к приемной пластине (см. рис. 2, кривые 2). В частности, на рис. 2 показано трехкратное падение электронной температуры по мере приближения к приемной пластине (см. рис. 2, б, кривые 2) и десятикратное падение плотности плазмы у приемной пластины по отношению к плотности при $Z = 50$ см (см. рис. 2, а, кривые 2) при нейтральном давлении $P_{\text{газ}} = 17$ мторр. При дальнейшем увеличении давления до $P_{\text{газ}} \sim 35-75$ мторр отмечалось общее снижение температуры электронов и плотности плазмы (см. рис. 2, б, кривые 3). При этом тенденция к уменьшению плотности плазмы и температуры электронов в продольном направлении ($Z \rightarrow 0$) сохранялась. Электронная температура вблизи приемной пластины не превышала 1 эВ, что, наряду с падением плотности плазмы, является признаком объемной рекомбинации плазмы.

Исследования спектров оптического излучения плазмы в видимой и ближней ультрафиолетовой областях проводились в зоне взаимодействия на расстоянии $Z = 50-80$ см от приемной пластины. Соответствующие спектры представлены на рис. 3. При низких давлениях нейтрального гелия в зоне взаимодействия $P_{\text{газ}} < 5$ мторр спектр излучения в диапазоне не имел каких-либо ярко выраженных особенностей и состоял из линий нейтрального гелия,

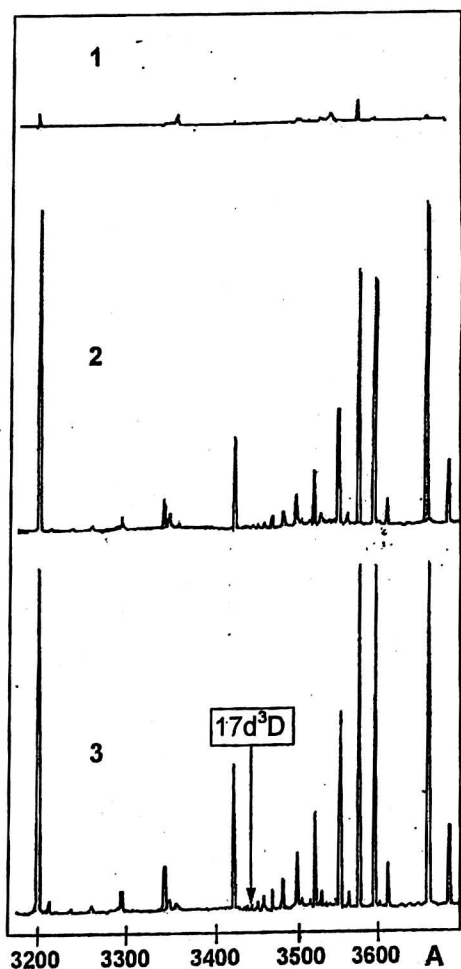


Рис. 3. Спектры оптического излучения из зоны взаимодействия плазменного потока с газом на расстоянии 50 см от приемной пластины для разных давлений газа (мторр):

1 — $P_{\text{газ}}=2$; 2 — $P_{\text{газ}}=17$; 3 — $P_{\text{газ}}=64$

обычно наблюдаемых при $T_e \sim 2\div 8$ эВ (см. рис. 3, кривая 1). При повышении давления до $P_{\text{газ}} \sim 15$ мторр вокруг плазменного потока образовывалась визуально наблюдаемая светящаяся структура, при этом характер спектра в области $3200\div 3700$ А менялся радикальным образом. Было зафиксировано интенсивное излучение линий нейтрального гелия HeI, соответствующих переходам с уровней, отвечающих сильному возбуждению и характеризующихся большими значениями главного квантового числа n вплоть до $n = 10\div 14$ при $P_{\text{газ}} \sim 17$ мторр, что характерно для рекомбинационного режима (см. рис. 3, кривые 2). Согласно зондовым данным, электронная температура в области свечения не превышала 1,7 эВ. Дальнейшее повышение давления приводило к появлению и нарастанию интенсивности свечения линий нейтрального гелия для переходов с уровней, вплотную примыкающих к границе сплошного спектра и потенциал возбуждения которых отличался от потенциала ионизации менее чем на 0,1 эВ (см. рис. 3, кривые 3). Так, например, на последнем из трех приведенных спектров отчетливо проявлен переход $17d^3D$ (энергия возбуждения верхнего уровня 24,5406 эВ) в виде линии HeI с длиной волны 3465 А.

С помощью комплекса микроволновой диагностики были проведены исследования ВЧ- и СВЧ-излучения из зоны взаимодействия в области частот $480\div 10\ 000$ МГц, при низких ($P_{\text{газ}} \sim 2$ мторр) и повышенных ($P_{\text{газ}} \sim 20$ мторр) давлениях нейтрального гелия в газовой мишени. Примеры спектров СВЧ-излучения плазмы в диапазонах $1200\div 1900$ и $2400\div 3800$ МГц при различных давлениях нейтрального газа приведены на рис. 4, а, б, соответственно. Из рис. 4, а, б видно, что при низких давлениях была зафиксирована эмиссия микроволн из зоны взаимодействия, при этом ситуация резко менялась при увеличении давления нейтрального газа. Начиная с давления $P_{\text{газ}} \sim 15$ мторр, с образованием визуально наблюдаемой структуры вокруг плазменного потока средствами микроволновой диагностики фиксировалось сильное (см. рис. 4, а), а в некоторых случаях полное (см. рис. 4, б) подавление излучения СВЧ-мощности из зоны взаимодействия.

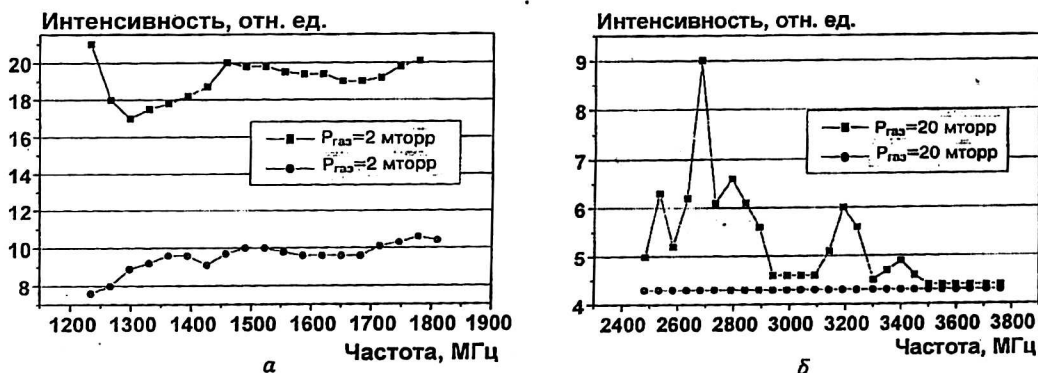


Рис. 4. Интенсивность микроволнового излучения из области взаимодействия при различных давлениях нейтрального газа:

а — в диапазоне $1200\div 1900$ МГц; б — в диапазоне $2400\div 3800$ МГц

Величины давлений нейтрального гелия, при которых начиналось подавление СВЧ-излучения и появление в оптическом спектре линий высоковозбужденных атомов, соответствуют друг другу.

Для исследования влияния параметров плазменного потока на характер взаимодействия с газовой мишенью были проведены эксперименты при различных режимах работы электронного инжектора. Увеличение инжектируе-

мой мощности привело в основном к увеличению начальной плотности плазменного потока и не внесло никаких качественных изменений в наблюдаемые зависимости параметров потока плазмы от давления нейтрального гелия в газовой мишени. Спектроскопические и СВЧ-исследования излучения из зоны взаимодействия показали, что повышение мощности инжектора привело к увеличению интенсивности излучения, однако качественный характер наблюдаемых явлений остался без изменений: при повышенных ($W_{инж}=1,5\div2,55$ кВт) мощностях инжектора, аналогично описанным выше случаям, наблюдалось формирование структуры, содержащей высоковозбужденные атомы гелия, сопровождающееся одновременным подавлением микроволнового излучения из зоны взаимодействия.

Измерения скорости гелиевой плазмы в газовой мишени в направлении вдоль силовых линий магнитного поля к приемной пластине проводились с помощью зонда Маха при различных давлениях нейтрального гелия в газовой мишени. Анализ экспериментальных данных проводился с использованием моделей, данных в [4÷6]. На рис. 5 представлены результаты измерения в виде зависимости числа Маха $M = v_f/c_s$ (v_f, c_s — скорости плазменного потока и ионного звука, соответственно) от давления в газовой мишени при двух различных значениях начальной плотности плазменного потока. Зависимость числа Маха рассчитана в соответствии с моделями П. Стэнджби, И. Хатчинсона, П. Харборта, Г. Праудфута. Показано, что при повышении давления

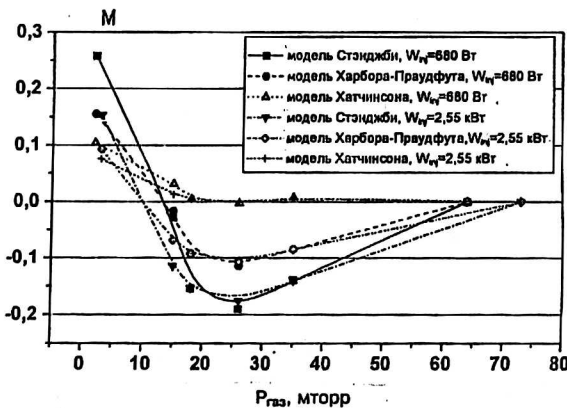


Рис. 5. Зависимость числа Маха от давления нейтрального газа при различной мощности, инжектируемой в плазму

нейтрального газа с 2 до 15 мторр скорость плазменного потока, движущегося к приемной пластине, уменьшалась. При дальнейшем повышении давления в газовой мишени происходило формирование обратного потока плазмы, движущегося от приемной пластины. Обнаруженное нами явление аналогично с возникновением обратного потока (flow reversal) от приемных пластин дивертора реактора-токамака [7]. При нейтральных давлениях $P_{газ} \sim 35$ мторр и выше происходило подавление обратного потока, которое при давлении 65÷75 мторр приводило к остановке потока плазмы в газовой мишени.

Обсуждение результатов

На основании экспериментальных данных было проведено аналитическое исследование взаимодействия плазменного потока с нейтральным гелием. Анализ проводился с помощью разработанного программного кода Analyst, описывающего взаимодействие гелиевой плазмы с нейтральным гелием в магнитном поле для условий эксперимента.

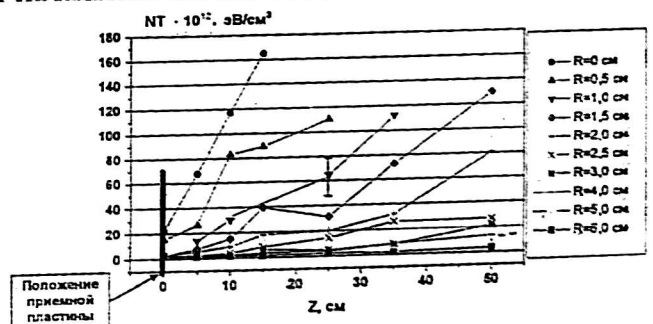
Были рассмотрены основные элементарные процессы, происходящие при взаимодействии гелиевой плазмы с нейтральным гелием. Показано, что в исследуемой плазме интенсивно протекают процессы упругого взаимодействия ионной и нейтральной компонент, что влечет за собой выравнивание ионной и нейтральной температур, аналогично условиям, наблюдаемым в диверторах токамаков, а также процессы резонансной перезарядки ионов He^+ на атомах гелия, приводящие к уменьшению направленного импульса плазменного потока, что согласуется с результатами измерений скорости последнего. Для условий эксперимента решено уравнение баланса плотности частиц для процессов рекомбинации плазмы и ионизации нейтрального газа, позволяющее установить границу перехода плазмы в рекомбинационный режим. Полученное значение электронной температуры $T_e \sim 1,4 \div 1,7$ эВ, соответствующее границе перехода, хорошо согласуется с данными зондовой и оптической диагностик.

Рассмотрено изменение параметров и характеристик плазменного потока при взаимодействии с газовой мишенью. Показано, что процессы поперечной диффузии играют основную роль в потерях частиц плазменным потоком при взаимодействии с нейтральным газом: для условий эксперимента при нейтральном давлении $P_{\text{газ}} = 35$ мторр, на удалении от приемной пластины $Z = 50$ см, за одну секунду плазменный поток теряет $\sim 2 \cdot 10^{17}$ частиц из 1 см^3 своего объема, что сравнимо с темпом увеличения плотности за счет ионизации.

Таким образом, поперечная диффузия является важным каналом уменьшения энергии плазменного потока. Для условий эксперимента составлено и решено уравнение баланса частиц с учетом процессов ионизации, рекомбинации, поперечной диффузии и продольного переноса в зависимости от температуры электронов. Полученные решения хорошо согласуются с экспериментально измеренными значениями электронной температуры, что свидетельствует о том, что полученное уравнение баланса частиц в плазменном потоке при взаимодействии с газовой мишенью отвечает экспериментальным условиям.

Проведен анализ изменения энергосодержания плазменного потока — важнейшей характеристики отрыва плазмы. Продольные распределения энергосодержания плазменного потока в газовой мишени, построенные по данным зондовой диагностики, свидетельствуют об экспериментальном получении условий, характеризующихся значительным (в некоторых случаях 130-кратным) падением энергосодержания вдоль силовых линий магнитного поля (рис. 6), а также уменьшением энергосодержания вблизи приемной пластины, что подтверждается результатами калориметрических исследований. Показано, что увеличение давления нейтрального гелия в газовой мишени приводит к уменьшению энергосодержания, причем этот процесс происходит более интенсивно при большей начальной плотности плазмы.

Рис. 6. Продольные распределения энергосодержания плазмы на различных радиальных расстояниях при давлении нейтрального газа $P_{\text{газ}} = 17$ мторр



Анализ роли излучательных процессов в энергосодержании плазмы показал, что излучательные потери достигают 70 % от общих потерь энергии плазменного потока при взаимодействии с нейтральным газом. Полученный результат хорошо согласуется с данными аналогичных исследований, проводимых в диверторах установок токамак.

Заключение

На установке "Лента" с прямым магнитным полем проведено экспериментальное исследование взаимодействия потока гелиевой плазмы с нейтральным гелием для моделирования процессов, происходящих в газовом диверторе реактора-токамака. Цель исследования — получение условий, при которых в газовой мишени происходит значительное падение энергосодержания плазменного потока в направлении вдоль силовых линий магнитного поля — режимов отрыва плазмы. В экспериментах использовались системы зондовой, оптической, калориметрической и СВЧ-диагностик.

Экспериментально получены условия, характеризующиеся значительным, в некоторых случаях 130-кратным, падением энергосодержания плазмы в продольном направлении, а также уменьшением энергосодержания плазменного потока вблизи приемной пластины имитатора и пластины дивертора, что подтверждается результатами зондовых и калориметрических исследований.

Проведено исследование влияния параметров плазмы и давления нейтрального газа на характер взаимодействия потока плазмы в газовой мишени. Экспериментально получено рекомбинационное состояние плазмы. Впервые обнаружено подавление микроволнового излучения на циклотронных частотах плазмы при образовании структуры, содержащей высоковозбужденные атомы гелия при повышенных нейтральных давлениях в газовой мишени. С повышением давления нейтрального газа обнаружены замедление потока плазмы в газовой мишени, возникновение обратного потока и последующее его подавление, приводящее к остановке потока плазмы при нейтральном давлении в газовой мишени $P_{\text{газ}} = 65 \div 75$ мторр.

Выполнен анализ изменения свойств и характеристик плазменного потока при взаимодействии с нейтральным газом. Определены основные процессы, влияющие на баланс частиц, энергосодержание и импульс потока плазмы в условиях эксперимента. Установлены граница перехода плазмы в рекомбинационное состояние, а также основная роль поперечной диффузии плазмы в потерях частиц плазменным потоком при взаимодействии с нейтральным газом. Согласно проведенным расчетам, излучательные потери плазменного потока в наших экспериментах могут достигать 70 % от общих потерь энергии плазменного потока при взаимодействии с нейтральным газом, что хорошо согласуется с данными аналогичных исследований, проводимых в диверторах установок токамак.

Литература

1. Антонов Н. В., Корниенко С. Н. и др. Моделирование процессов в газовом диверторе на установке с прямым магнитным полем // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 51—58.
2. Хрипунов Б. И., Шолин Г. В. и др. Взаимодействие плазмы с газовой мишенью в магнитном поле // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1999. № 2. С. 53—60.
3. Нектаров Е. С., Петров В. Б., Сычев В. В., Хрипунов Б. И., Шапкин В. В., Шолин Г. В. О роли сильно возбужденных атомов в процессе торможения потоков плазмы на газовых мишенях // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 5. С. 431—435.
4. Stangeby P. Measuring plasma drift velocities in tokamak edge plasmas using probes // Phys. Fluids. 1984. № 27. P. 2699—2704.

5. *Hutchinson I. H.* A fluid theory of ion collection by probes in strong magnetic fields with plasma flow // *Ibid.* 1987. № 30. P. 3777—3781.
6. *Proudfoot G., Harbour P. J., Allen J.* A Lewis Poloidal and radial variations in plasma transport in a limiter SOL in DITE // *JNM.* 1984. № 128—129. P. 180—185.
7. *Stangeby P.* The plasma boundary of magnetic fusion devices: IOP Publishing, Bristol, Philadelphia, 2000.

Experimental model operation on linear installation for processes of a reactor-tokamak gas divertor

N. V. Antonov, V. B. Petrov, B. I. Khripunov, V. V. Shapkin
Institute for Nuclear Fusion, Moscow, Russia

A. M. Litnovskiy
Moscow Engineering and Physical Institute, Moscow, Russia

G. V. Sholin
Institute for H-Energy and Plasma Technology, Moscow, Russia

On installation with a direct magnetic field the experimental model operation of physical processes happening in a divertor of a thermonuclear reactor is conducted. The mode of a plasma separation, the basic duty of a divertor, had been obtained and explored in detail during experiments.